



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**POSOUZENÍ MOŽNOSTÍ ÚSPOR VODY V OCELÁŘSKÉM  
PRŮMYSLU**

ASSESSMENT OF POSSIBILITIES FOR REDUCTION OF WATER CONSUMPTION IN STEEL INDUSTRY

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Tomáš Bohunský

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Lubomír Klimeš, Ph.D.

**BRNO 2019**



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Tomáš Bohunský**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Lubomír Klimeš, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Posouzení možností úspor vody v ocelářském průmyslu

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současné době spotřebovávají ocelářské provozy obrovské množství vody, která se postupně začíná stávat vzácnou a nedostatečnou surovinou. Zhodnocení možností, které by umožnily snížit a omezit spotřebu vody, je počátečním krokem k udržitelnému hospodaření s vodou.

### Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je provést rešerši současného stavu a zhodnotit možnosti pro snižování spotřeby vody v ocelářských provozech, ve kterých se voda používá zejména k chlazení ocelových předlůvků. Cíle práce jsou následující:

- 1) Provést rešerši aktuální spotřeby vody v ocelářských provozech.
- 2) Provést rešerši možností a přístupů, pomocí kterých lze snížit spotřebu vody.
- 3) Provést rozbor a kvantitativní zhodnocení použití prostředků pro snížení spotřeby vody.

### Seznam doporučené literatury:

KLEMEŠ, Jiří Jaromír. Assessing and measuring environmental impact and sustainability. Waltham, MA: Butterworth-Heinemann, 2015. ISBN 978-012-7999-685.

HOEKSTRA, Arjen Y. The water footprint of modern consumer society. New York: Earthscan, from Routledge, 2013. ISBN 978-184-9714-273.

VERHOEVEN, John D. Steel metallurgy for the non-metallurgist. Materials Park, Ohio: ASM International, 2007. ISBN 08-717-0858-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## Abstrakt

Tato bakalářská práce posuzuje možnosti úspory vody v ocelářském průmyslu a jednotlivé metody, které v procesu výroby oceli snižují vodní stopu. Nejprve je představena současná situace v ocelářském průmyslu a klasifikován problém nadměrné spotřeby vody. Následně je věnována největší část práce sestavení univerzálního postupu aplikovatelného v kterémkoliv z ocelářských podniků. Tento postup se skládá z analytických modelací a charakteristik konkrétních úsporných metod. Výsledky jsou zpracovány do tabulky, která obsahuje jejich podrobný vliv na celý výrobní proces.

## Summary

This bachelor thesis assesses possibilities for a reduction of water consumption in the steel industry and individual methods reducing water footprint in the whole process of steel making. At the beginning, the current situation of the steel industry is introduced and the problem with excessive water consumption classified. The biggest part of this thesis is then dedicated to the construction of universal procedure which can be applied in any steel plant. This procedure consists of analytical models and the specification of individual water-saving technologies. The results are compiled in a table containing the detailed influence on the whole manufacturing process.

## Klíčová slova

Spotřeba vody, ocelářský průmysl, analýza toku substance, technologie pro úsporu vody

## Keywords

Water consumption, steel industry, substance flow analysis, water-saving technologies

BOHUNSKÝ, Tomáš. *Posouzení možností úspor vody v ocelářském průmyslu* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116454>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Lubomír Klimeš.



Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci *Posouzení možností úspor vody v ocelářském průmyslu* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Lubomíra Klimeše, Ph.D. a s využitím odborných materiálů uvedených v seznamu zdrojů na konci práce.

V Brně dne .....

Tomáš Bohunský





Mé poděkování patří vedoucímu práce Ing. Lubomírovi Klimešovi, PhD., jehož nadhled a optimismus pro mě zůstává inspirací, rodině, která mi pro práci poskytla dostatek prostoru, a Elišce, která mi ukázala, jak málo toho vím o práci v MS Office.

Tomáš Bohunský



# Obsah

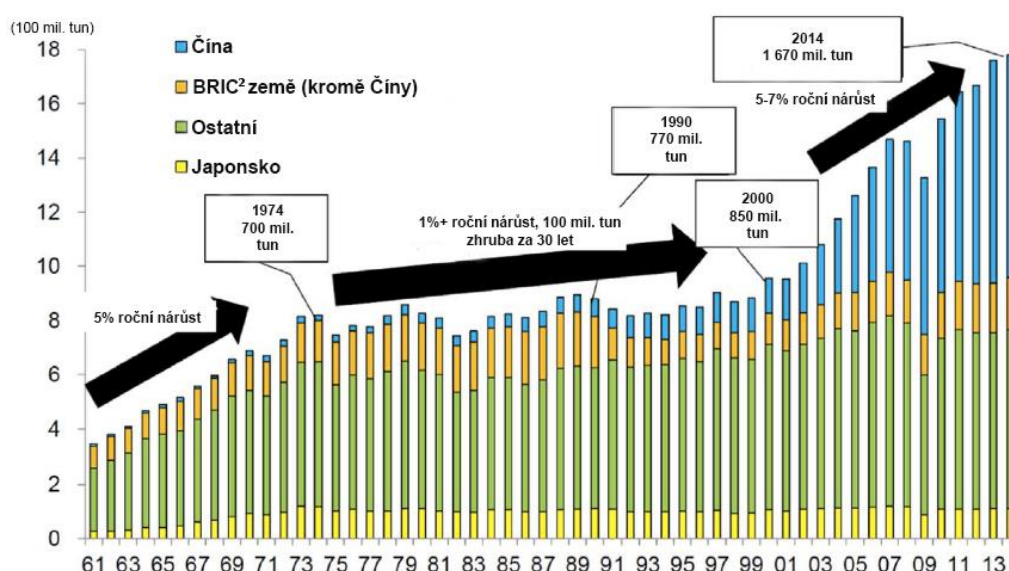
1	Úvod.....	11
2	Metodologie.....	13
2.1	Analytické metody .....	13
2.1.1	Modelace vodní sítě.....	13
2.1.2	Analýza toku materiálu .....	15
2.1.3	Posuzování životního cyklu .....	17
2.2	Technologické metody .....	18
2.2.1	Využití nanokapalin během chlazení .....	18
2.2.2	Optimalizace chladicí sekce .....	19
2.2.3	Suché hašení koksu .....	20
2.2.4	Přidávání drceného uhlí .....	21
2.2.5	Zpětné získávání tepla při koksování.....	21
2.2.6	Turbínová jednotka pro obnovu tlaku.....	22
2.3	Alternativní metody – přímá redukce.....	22
2.4	Zhodnocení výsledků .....	23
3	Závěr.....	26
4	Seznam použitých zdrojů .....	27



# 1 Úvod

Výroba oceli je energeticky náročný proces a vyžaduje velké množství různých zdrojů. V roce 2013 představovalo ocelářské odvětví 18 % celosvětové spotřeby energie všeobecně. Z toho vody se na produkci jedné tuny oceli spotřebuje přímo i nepřímo bezmála až 235 000 litrů [1]. V hutních podnicích se používá voda například k přímému a nepřímému chlazení, čištění plynu, narušování okujů a praní. Globální výroba surové oceli vzrostla během let 2000 až 2014 o 96 % s průměrný ročním nárůstem o 6,9 % (viz obrázek 1). Jelikož se toto tempo nebude v následujících letech zvolňovat, je společnost postavena před významný problém spotřeby energie.

Rapidní rozmach výrobní kapacity měl pozitivní dopad na energetickou efektivitu v průmyslu, zpravidla ale právě na úkor hospodaření s přírodními zdroji. Dodnes málokterá společnost praktikuje nejlepší dostupné techniky (BAT<sup>1</sup>). Podle údajů z roku 2012 má ocelářský průmysl potenciál snížit svou energetickou stopu o 20 %. Z toho největší prostor pro zlepšení má Čína, kde spotřebovává ocelářský průmysl zhruba 14 % celkové vody zpracovávané v průmyslu [3, 4].



Obr. 1 Globální produkce surové oceli (1961-2014); přejato z [5] a upraveno

Čerstvá voda je pro lidstvo tím nejdůležitějším zdrojem – vodní zdroje jsou esenciální podmínkou pro vznik a udržitelnost života. Například Egypt a jeho řeka Nil (obrázek 2) jsou dobrým příkladem toho, jak život na vodě závisí. Zatímco pro jednotlivé druhy neobnovitelných zdrojů zvládá lidstvo v průběhu let nacházet ekvivalenty, pro vodu žádná náhrada neexistuje.

Očekává se, že lidstvo dosáhne kolem roku 2050 populace více než devět miliard. Ke stejnému datu vzrostou požadavky na vodu o 55 % a pro zabránění masivního sucha a hladomoru budou nutné inovace v souladu s těmito omezenými zdroji [6]. V roce 2013 byl počet lidí bez přístupu ke zdravotně nezávadné vodě odhadován na 780 milionů a počet lidí bez kanalizace nebo hygienických zařízení na 2,5 miliard.

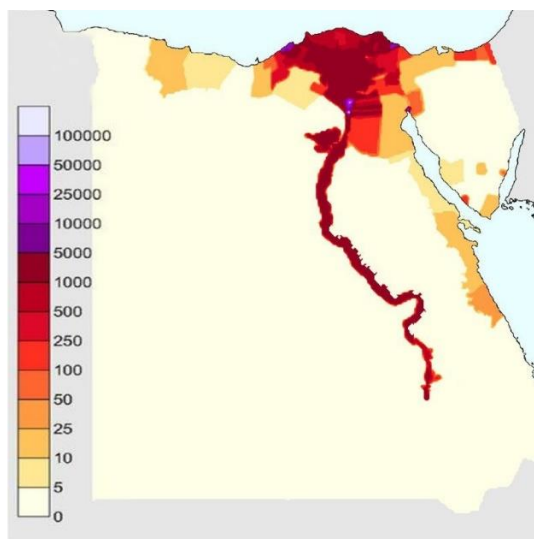
<sup>1</sup> the best available technologies; jejich seznam je pravidelně aktualizován v příslušných referenčních dokumentech (BREF), o jejichž vypracování rozhoduje Evropská komise; požadavkem však je, aby byly referenční dokumenty BREF aktualizovány nejpozději osm let po zveřejnění předchozí verze [2]

<sup>2</sup> uskupení Brazílie, Indie, Ruska a Číny

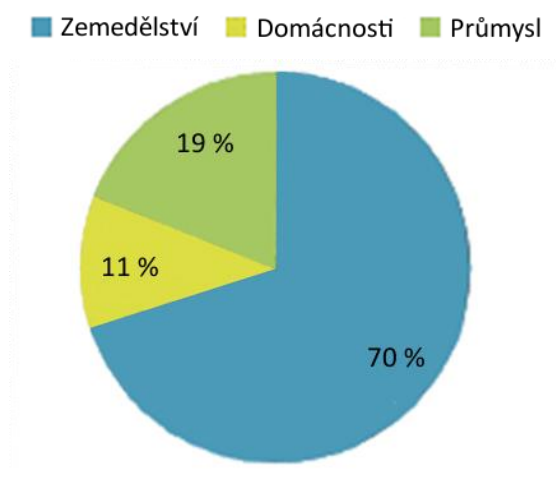
Ročně umírá v důsledku nedostačující kvality vody více než tři miliony lidí [7]. Přestože se této problematice ve společnosti nepřikládá takový důraz jako klimatickým změnám nebo plastům v oceánech, vodní krize spojená s plýtváním vody, znečištěním nebo změnami v její dostupnosti dnes patří mezi celosvětové problémy [7].

V každé ocelárně existuje řada nejrozumnějších metod pro snížení spotřeby, z toho je velká část rentabilních. Často nejsou ale ani tyto metody aplikovány. Důvodem pro tuto skutečnost je v první řadě omezená informovanost [4]. Tato práce předkládá některé z oněch metod, které by umožnily v procesu výroby oceli snížit vodní stopu.

Pro zachování objektivity je také vhodné zmínit, že ačkoliv spotřebovává průmysl ohromné množství vody, toto odvětví zdaleka nepatří mezi největšího konzumenta – zemědělství má spotřebu několikanásobně vyšší a mnohem větší prostory pro zefektivnění – viz obrázek 3 [8].



Obr. 2 Hustota zalidnění v Egyptě koncentrovaná kolem řeky Nil; přejato z [9]



Obr. 3 Celosvětová spotřeba vody podle odvětví; přejato z [10] a upraveno

## 2 Metodologie

Je celá řada metod pro celoplošné úspory vody. Například recyklace, změny ve výrobních procesech, aplikace nejúčinnějších technologií nebo zavedení opatření zabraňující únikům. Podle určitých odhadů by bylo možné snížit v EU spotřebu vody o 40 % z celkového množství pouze zavedením technologických opatření [11]. Vzhledem k relativně nízkým cenám vody se takovýmito přístupům ale zatím nepřikládá adekvátní pozornost.

Dále nemusí metody pro úsporu vody vycházet jen z technických analýz a modelových studií. Hledání nových cest k úsporám a vyšší efektivitě lze podnítit ekologickými reformami, přijetím politiky nulového odpadu, změnou konzumních vzorců, ale také zvýšením ceny vody. Právě takovýto krok by velice efektivně ovlivnil přístup veřejnosti a společností k šetrnému zacházení s vodou. Výchozím krokem pro všechny uvedené metody je ale zvýšení povědomí o současné situaci a s ní spojených následcích [8].

Následující odstavce obsahují konkrétní postupy pro celkové snižování vodní stopy, které jsou aplikovatelné na jakýkoliv ocelářský podnik.

### 2.1 Analytické metody

Analytické metody slouží v ocelářském průmyslu k sestavení modelací a k jejich vyhodnocení. Představují první krok při hledání úspor vody. Jejich provedení je často časově náročné, nepojí se s nimi ale žádné markantnější výdaje [12]. Technologickým metodám, jejichž podstatou je aplikace určitého jevu do procesu výroby oceli, je dále věnována zvláštní kapitola.

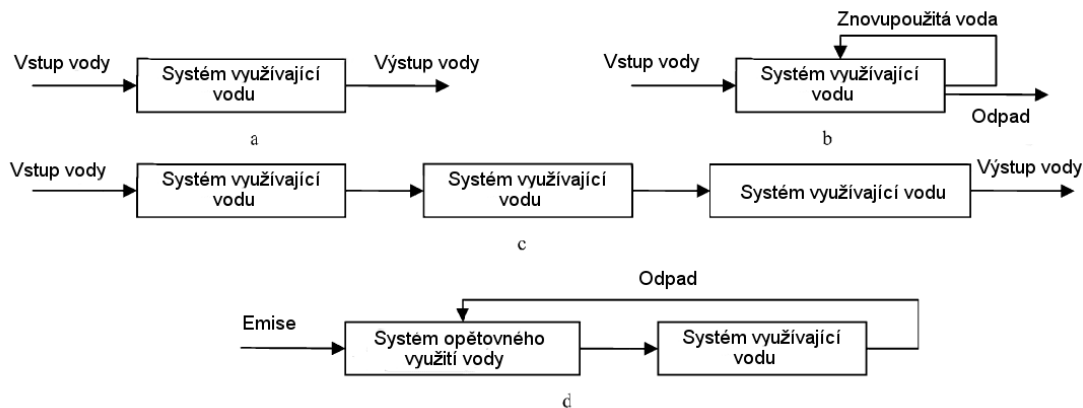
#### 2.1.1 Modelace vodní sítě

Vodní zařízení nebo výrobní procesy mohou být označeny jako systémy využívající vodu. Těch může být v ocelárnách celá řada. Obecně však mohou být rozděleny, nezávisle na jejich velikosti, do čtyř typů: jednorázový systém, oběžný systém, kaskádový systém a znovupoužitelný systém.

V jednorázovém systému je voda o určité kvalitě použita jen jednou, a následně je ze systému odstraněna. Oběžný systém znamená, že během produkce je odstraněná voda znovu použita, ať už přímo, nebo po ošetření. Kaskádový systém znamená, že voda odstraněná z určitého procesu je znovu použita v některém z dalších procesů v sekvencích odpovídajících různým požadavkům na teplotu nebo kvalitu vody. Znovupoužitelný systém znamená, že voda odstraněná ze systému je ošetřena a znovu použita v některém z jiných výrobních procesů celého podniku (obrázek 4).

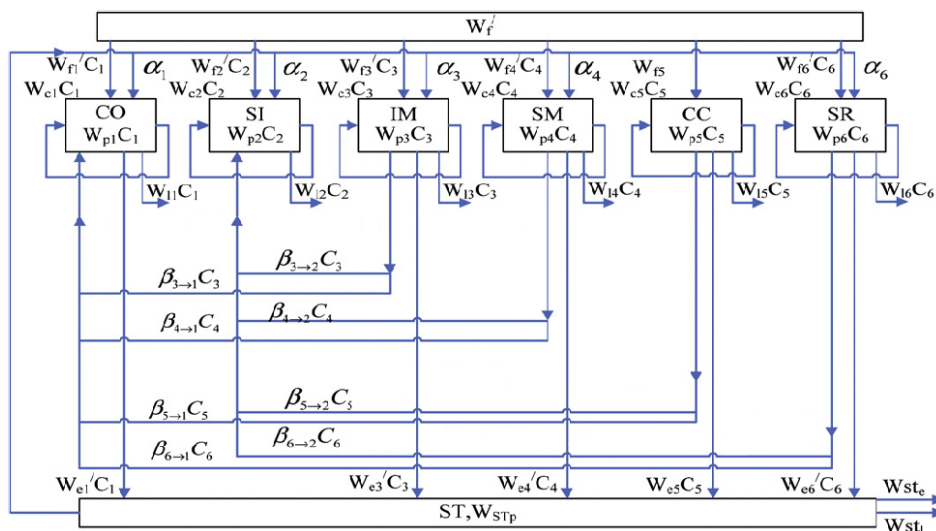
Výroba oceli se dělí do šesti hlavních procesů: koksování, spékání, výroba železa, výroba oceli, kontinuální odlévání a válcování. Některé z těchto procesů vyžadují vodu čerstvou, jiným stačí voda o nižší kvalitě. Například koksování a spékání mají na kvalitu vody nízké požadavky, zatímco kontinuální lití nebo válcování vysoké.

Na základě těchto poznatků může být vytvořeno schéma celkové vodní sítě podniků zohledňující návaznost jednotlivých výrobních procesů a jejich požadavky na



Obr. 4 Schématické znázornění jednotlivých systémů využívajících vodu a) jednorázový systém; b) oběhový systém; c) kaskádový systém d) znovupoužitelný systém; přejato z [12] a upraveno

kvalitu vodních zdrojů podle systémů, které byly popsány výše. Příklad takové vodní sítě je předveden na obrázku 5. Jsou na něm znázorněny jednotlivé výrobní procesy a mezi nimi vytvořeny dráhy, kterými voda putuje od svého uvolnění ze zdroje až po moment, kdy je z celé sestavy odstraněna. A to buďto ve formě odpadní vody, nebo jako ztráta během některých z dalších procesů. Jak bylo zmíněno výše, nejnižší požadavky na kvalitu vody mají procesy koksování a spékání. Na obrázku si lze tudíž jasně všimnout toho, jak je do těchto dvou procesů veškerá recyklována voda postupně vracena.



Obr. 5 Příklad vodní sítě, přičemž CO – koksování, SI – spékání, IM – výroba železa, SM – výroba oceli, CC – kontinuální odlévání, SR – válcování, ST – zpracování odpadu, W – jednotka spotřeby vody, C – výroba produktu,  $\alpha$  – voda dodávaná ze zdroje do jednotlivých procesů,  $\beta$  – voda dodávaná napříč jednotlivými procesy, indexy 1, 2...6 reprezentující koksování, spékání, výrobu železa, výrobu oceli a kontinuální odlévání v tomto pořadí, c – recyklovaná voda, e – emise odpadních vod, f – přidání čerstvé vody, l – ztráty vody, p – celková spotřeba vody, st – voda v čistírně odpadních vod; přejato z [12] a upraveno



Samotné sestavení vodní sítě sice přímo žádnou vodu nešetří, slouží ale jako podklad pro další úsporné operace a metody. Stejně tak může posloužit k identifikování nejzávažnějších nedostatků ve využívání vody. Konkrétně v Číně, která je zaměřená hlavně na velikost produkce a výrobní technologie, spíše než na ekologický dopad, by už tato modelace pomohla odhalit ty nejzávažnější mezery v hospodaření s vodními zdroji [12].

## 2.1.2 Analýza toku materiálu

Analýza toku materiálu<sup>3</sup> je analytická metoda, která je považována za klíčovou metodu při optimalizaci produkce. Jejím cílem je kvantifikovat a následně optimalizovat výrobní procesy tak, aby byly materiály a energie využívány co nejefektivněji – například recyklací nebo snižováním množství odpadu. Při tom vychází právě z modelace vodní sítě z předchozí podkapitoly.

Analýza toku materiálu vztažená na ocelářský průmysl determinuje rozdíl mezi množstvím spotřebované vody a množstvím spotřebované vody v optimálním stavu. Také zohledňuje skutečnost, že spotřeba vody během jednotlivých procesů není rozdělena rovnoměrně a že je tudíž vhodné věnovat zvýšenou pozornost především těm procesům, kde bude znamenat úspora vody největší rozdíl.

Gao a kol. [3] provedli případovou studii na závodě v provincii Liao-ning v severovýchodní Číně, který má roční kapacitu produkce zhruba  $2,3 \times 10^7$  tun oceli. V tabulce 1 jsou zaznamenány výsledky obou zmíněných přístupů pro kompletní proces výroby oceli.

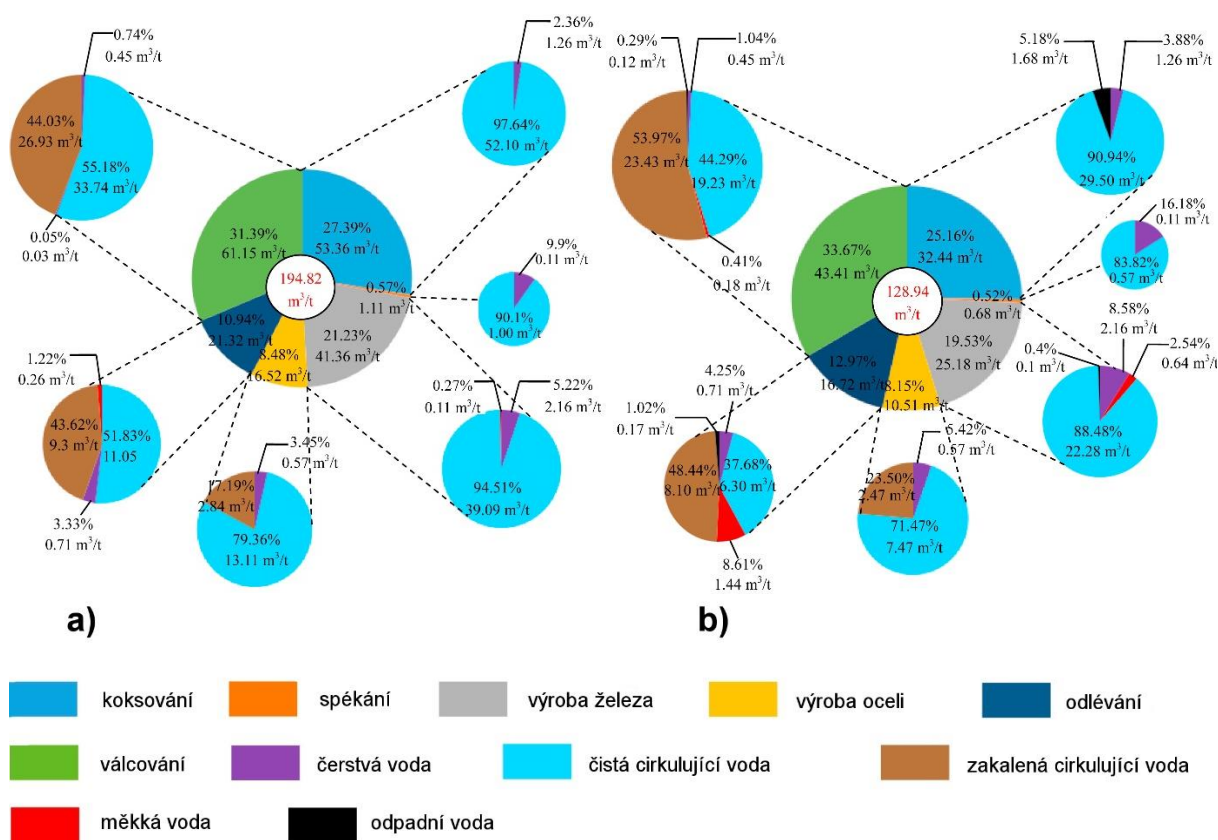
Tabulka 1 Spotřeba vody každého dílčího procesu výroby na základě analýzy množství vody a množství vody v optimálním stavu; přejato z [3]

	Analýza množství vody		Analýza množství vody v optimálním stavu	
	Spotřeba vody na jednotku výrobku [m <sup>3</sup> /t]	Procentuální podíl [%]	Spotřeba vody na jednotku výrobku [m <sup>3</sup> /t]	Procentuální podíl [%]
Koksování	53,36	22,39	32,44	25,16
Spékání	1,11	0,57	0,68	0,52
Výroba železa	41,36	21,23	25,18	19,53
Výroba oceli	16,52	8,48	10,51	8,15
Odlévání	21,32	10,94	16,72	12,97
Válcování	61,15	31,39	43,41	33,67
Celkově	194,82	100	128,94	100

<sup>3</sup> Material Flow Analysis – MFA, někdy Substance Flow Analysis – SFA

Jak tabulka 1 ukazuje, proces válcování spotřebovává největší objem vody ne-  
hledě na použití konkrétní metody, a to 31,39 % u analýzy množství vody a 33,67 %  
u analýzy množství vody v optimálním stavu. Z druhé strany má proces spékání nej-  
menší požadavky na objem vody, a to 0,57 % a 0,52 % při stejném pořadí analýz.  
Z tabulky je dále patrné, že v optimálním stavu poklesla spotřeba vody u každého z díl-  
čích procesů, celkově o cca 66 m<sup>3</sup>/t, čili o takřka 35 %. To je způsobeno právě vhodnou  
úpravou vodní sítě, recyklací vody a jejím efektivním využitím.

Konkrétní spotřeby vody každého z dílčích procesů podle její kvality jsou zná-  
zorněny na obrázku 6. Největší množství vody spotřebovávají procesy koksování  
a válcování – cca 59 % z celkového finálního produktu. Při hledání nových cest k nižší  
spotřebě vody by proto měl být kladen důraz především na tyto procesy. Zvláště pro-  
cesu koksování je dále věnována zvláštní pozornost v podkapitole technologických  
metod.



Obr. 6 Spotřeba vody odlišné kvality v každém z procesů založená na a) analýze množství spotřebované vody a b) na analýze množství spotřebované vody v optimálním stavu; přejato z [3] a upraveno

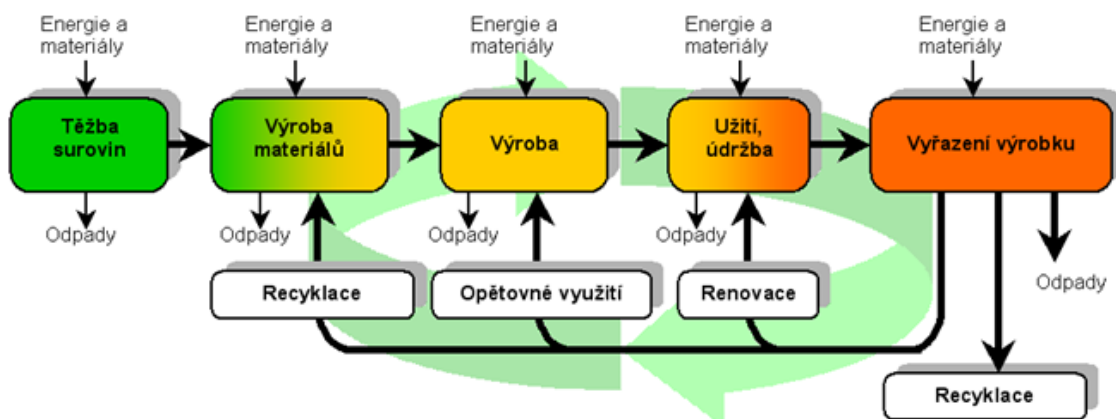
Na obrázcích lze pozorovat, že provedení analýzy toku materiálu nemá nijak zásadní vliv na procentuální zastoupení spotřebované vody napříč celým výrobním procesem. Mnohem větší význam mají konkrétní hodnoty rozdílů spotřebované vody. U procesů, u kterých není natolik zásadní kvalita použité vody došlo optimalizací vodní sítě k redukci zhruba o 40 %. Oproti tomu u odlévání a válcování jsou vzhledem k vyšším požadavkům na kvalitu vody možnosti více omezené. Přesto bylo dosaženo úspory více než 20 % u odlévání a asi 30 % u válcování.

Míra cirkulující vody již dosáhla v ocelářském průmyslu vysoké úrovně – spotřeba čisté a zakalené cirkulující vody je největší ze všech druhů vod v každém z dílčích procesů nehledě na použití analytické metody. Snahy o recyklaci vody jsou zde patné a čerstvou vodou je nutné doplňovat pouze ztráty během jednotlivých procesů, jako například při odpaření. Jelikož je ale vyšší efektivita oběhu vody řešením nedostatku vodních zdrojů v průmyslu jen do určité míry, měly by být zváženy i jiné přístupy, jako snižování nákladu na ošetření vod o různých kvalitách nebo snižování nepřímé spotřeby vody [3, 12].

### 2.1.3 Posuzování životního cyklu

Právě nepřímou spotřebou vody blíže specifikuje analytická metoda posuzování životního cyklu. Metoda systematicky vyhodnocuje potenciální dopady produktů na životní prostředí. Při tom bere v úvahu všechny fáze životního cyklu, a to od získávání surovin až po konečné odložení odpadů do země.

Je to jediný nástroj, který posuzuje environmentální dopady produktu v průběhu jeho celého životního cyklu. Může proto sloužit k identifikaci možností zlepšení posuzovaného produktu ve všech jeho fázích. Schématický princip metody je znázorněn na obrázku 7. Její princip spočívá ve snaze minimalizovat jakýkoliv dopad na spotřebu zdrojů nebo emise vypuštěné do okolí. Každá fáze produktu vyžaduje určité množství dodané energie a před posunem do dalšího kroku po sobě zanechává odpad. Důraz je proto kladen na snahu maximálně využít odpady v některých z dalších fází života, používání recyklovatelných materiálů nebo spotřebovávání energie z obnovitelných zdrojů v co nejvíce možné míře.



Obr. 7 Schématický princip metody posuzování životního cyklu [13]

Metoda posuzování životního cyklu vztažená na ocelářský průmysl se zabývá například těžbou železné rudy, nakládání s odpadem, přepravou, vzniku emisí nebo také okupací půdy. Je ale značně variabilní. Jelikož se procesy spojené s ocelí liší v každé ocelárně, bude se také lišit každá konkrétní analýza. V této práci je proto uvedena pouze pro úplnost jako metoda, která se zabývá nepřímou spotřebou surovin. Konkrétní hodnoty úspor zde ale nejsou k dispozici [14].

## 2.2 Technologické metody

V této fázi jsou ve výrobním systému aplikovány jednotlivé metody pro úsporu vody. Některým z těchto technologií je věnováno více pozornosti a jsou detailněji popsány níže. Jejich vyhodnocení je následně zpracováno v tabulce 3 a grafu 3.

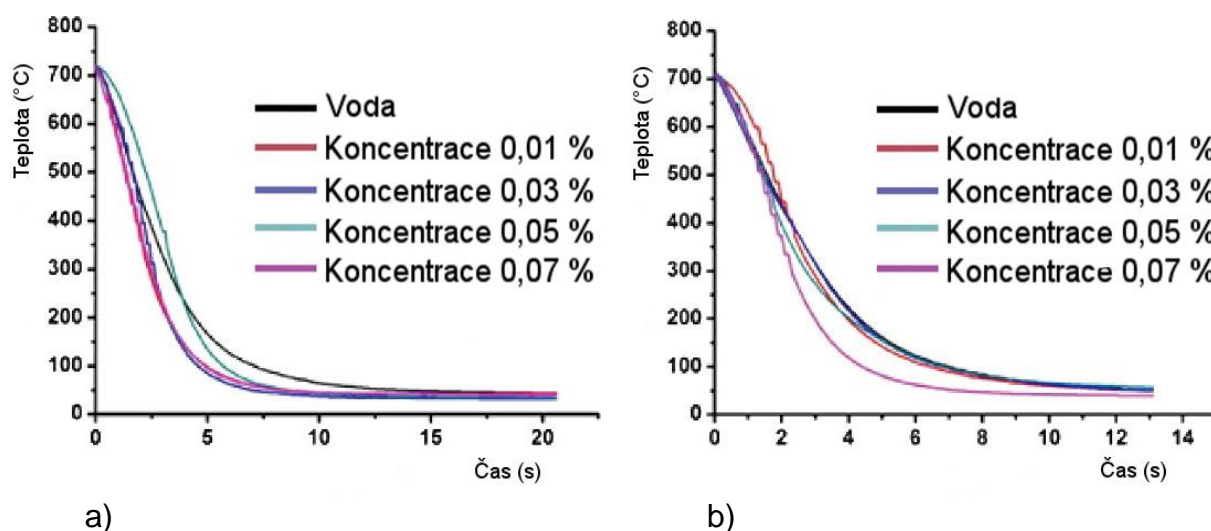
Aplikace specifické technologie neovlivňuje pouze spotřebu vody, nýbrž i další okolnosti s přímým vlivem na ekologický dopad, jako je například množství uvolněných nečistot, emisí  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  nebo  $\text{NO}_x$ <sup>4</sup>, ale také spotřebu energie, uhlí, nebo i změnu výrobních nákladů. Tato provázanost je natolik významná, že není vhodné posuzovat jednotlivé metody vztažené pouze na jeden z těchto faktorů. Místo toho je žádoucí brát v úvahu jejich vzájemnou souvislost a počítat s faktem, že přestože bude konkrétní technologie šetřit například značnou část vody a uhlí, může tak být na úkor vyšších nákladů nebo vyšší produkce emisí. V takovém případě je nutné individuální rozhodnutí každé z oceláren, popř. vytvoření kompromisu [15].

### 2.2.1 Využití nanokapalin během chlazení

Pro studii této metody využili Nayak a kol. [16] během chlazení oceli dva druhy nanokapalin – směs destilované vody a oxidu hlinitého  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a směs destilované vody a oxidu titaničitý  $\text{TiO}_2$ .

Testy byly provedeny za účelem prozkoumání vlivu nanokapalin na změnu součinitele přestupu tepla. Údaje byly naměřeny pro nanokapaliny s nanočásticemi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{TiO}_2$  o koncentraci 0,01 %, 0,03 % a 0,07 %. Pro srovnání bylo základní měření provedeno pro destilovanou vodu bez nanočástic.

Výsledky měření jsou znázorněny v grafu 1. Obě křivky byly vytvořeny při tlaku v tryskách 0,1863 baru. Z grafů lze vyhodnotit, že ačkoliv se nejefektivnější koncentrace u každého druhu nanokapaliny liší, jejich použití má na součinitele přestupu tepla ve srovnání s vodou pozitivní vliv. Jelikož je z oceli odváděno teplo rychleji, pro



Graf 1 Výsledky měření pro a)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a b) pro  $\text{TiO}_2$ ; přejato z [16] a upraveno

<sup>4</sup> především oxid dusný (NO) a oxid dusičitý ( $\text{NO}_2$ )

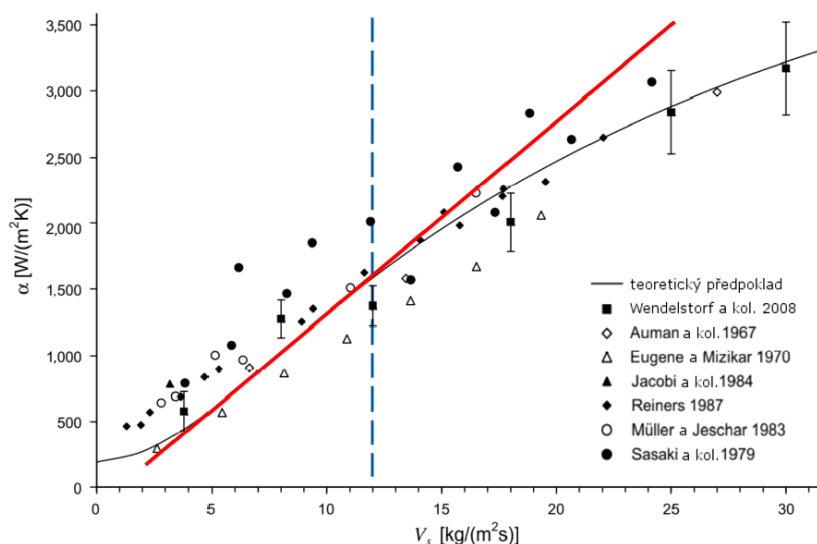
dosažení její stejné koncové teploty není potřeba takové množství vody. Dále je patrné, že použití  $\text{Al}_2\text{O}_3$  je efektivnější než  $\text{TiO}_2$ . Možné vysvětlení pro tento jev je rovnoměrnější rozložení částic  $\text{Al}_2\text{O}_3$  v kapalině.

Přestup tepla ovlivňuje v tomto případě velké množství faktorů. Není to jen koncentrace a typ nanokapaliny, ale i velikost částic, tvar trysky, tlak uvnitř trysky nebo vzdálenost konce trysky od povrchu oceli. Obrovská variabilita tohoto experimentu bohužel vede k tomu, že je doposud vytvořeno jen velmi malé množství relevantních závěrů. Konkrétní hodnoty tlaků nebo koncentrací by měly při jejich specifické kombinaci efekt přesně opačný, tj. součinitel přestupu tepla by byl snižován a spotřeba vody v daném procesu by byla zvyšována. Proto, přestože byl pozitivní vliv nanokapalin na úsporu vody prokázán, nemá tento experiment ve výsledné tabulce konkrétní hodnoty [16, 17].

## 2.2.2 Optimalizace chladicí sekce

Tryskám lze věnovat více pozornosti a mimo použití přísad do chladicí kapaliny se zabývat také jejich optimálním návrhem. Wendelstorf a kol. [18] zkoumali různé hodnoty součinitele přestupu tepla během chlazení při použití široké škály průtoků vody. Pro prozkoumání závislosti těchto dvou faktorů byla provedena série měření. Na základě dat obdržených z experimentu byl sestaven vztah, ve kterém byl popsán součinitel přestupu tepla jako funkce povrchové teploty oceli a průtoku vody.

Na grafu 2 je znázorněn vývoj závislosti mezi součinitelem přestupu tepla a průtokem vody v trysce pro povrchovou teplotu  $700\text{ }^\circ\text{C}$ . Jak značí červené proložení, v rozmezí hodnot průtoku vody  $3\text{--}12\text{ kg/m}^2\text{s}$  roste součinitel přestupu tepla lineárně. Nicméně nad hodnotou  $12\text{ kg/m}^2\text{s}$  začíná intenzita přestupu tepla klesat.



Graf 2 Závislost součinitele přestupu tepla ( $\alpha$ ) na průtoku vody ( $V_s$ ); přejato z [18] a upraveno

Z hlediska snižování spotřeby vody tím pádem není průtok vody s hodnotou nad  $12\text{ kg/m}^2\text{s}$  efektivní a v případě nutnosti udržovat jej nad touto hodnotou bylo by vhodnější přepracování chladicí sekce – nahrazení trysek s vysokým průtokem větším počtem trysek s malým průtokem. Průtok by tak byl udržován ne efektivní hodnotě

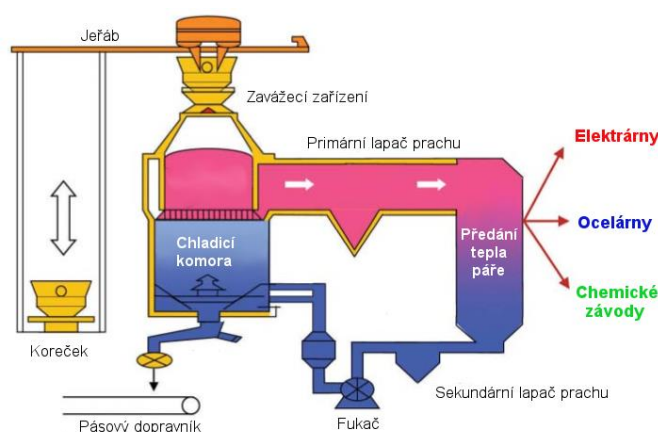


a zároveň by bylo možné ochladit za určitý časový úsek stejné množství oceli. Úspora vody se tím pádem bude lišit u každé ocelárny podle toho, na jakou hodnotu průtoku jsou tamní trysky nastaveny [18, 19].

### 2.2.3 Suché hašení koksu

Aby se zabránilo okamžitému hoření žhavého koksu při styku s okolní atmosférou, je nutné jeho intenzivní chlazení, a to z teploty cca 1000 °C na teplotu cca 150 °C. Během mokrého hašení je používána voda, během suchého hašení cirkulující směs plynu, kterou tvoří především dusík a další inertní plyny.

Směs plynu následně odevzdává nabyté teplo v parním kotli, kde toto teplo přispívá k výrobě páry. Na plný výkon vyprodukuje pracující jednotka asi 25 t/h vysokotlaké páry o tlaku 93 barů. Koks je následně přepravován pásovými dopravníky do vysoké pece. Po uzavření tohoto cyklu může být směs opět použita pro další hašení. Schéma zařízení na suché hašení koksu je znázorněno na obrázku 8. Systém je tvořen šachtovou chladičí jednotkou, kotlem na odpadní teplo a systémem recyklace plynu.



Obr. 8 Schéma zařízení na suché hašení koksu; přejato z [20] a upraveno

Výhodou je mimo značnou úsporu vody a energie také koks zbavený vlhkostí, což je u vysokých pecí výhodou. Zachycený koksový prach lze také dodávat jako palivo aglomeračnímu zařízení. Úspory vody se týká voda, která by byla jinak spotřebována při mokrému hašení, úspor energie pak teplo získané z inertního plynu pro výrobu páry. Při mokrému hašení sice žádná odpadní voda nevzniká a lze ji plně recyklovat, je ale nutné počítat se ztrátami při vypařování, které mohou činit až 1 m<sup>3</sup>/t koksu a musí se nahradit čerstvou vodou.

Hlavní nevýhodou suchého hašení jsou relativně vysoké finanční náklady (viz tabulka 3). Vzhledem k některým evropským plánům na úspory energií, například „zeleňým certifikátům“<sup>5</sup>, a dalším projektům se ale může návratnost podstatně zkrátit.

Suché hašení koksu má svůj původ v Sovětském svazu a zemích, kde klesají během zimního období teploty na takovou hodnotu, že mokré hašení je buďto velmi komplikované, nebo přímo nemožné [22, 23].

<sup>5</sup> obchodovatelná komodita dokládající, že určité množství elektřiny bylo vyrobeno s využitím obnovitelných zdrojů energie; již byly zavedeny v Nizozemí, Belgii, Rakousku, Polsku, Rumunsku a řadě dalších zemí [21]

## 2.2.4 Přidávání drceného uhlí

Jedním ze základních principů pro snižování výrobních nákladů je přidávání náhradních paliv do vysoké pece. Drcené, někdy také prachové uhlí je jedním z těchto náhradních paliv. Spolu s olejem je používáno nejčastěji. Jeho použití snižuje celkové množství použitého koksu, jehož výroba má značný dopad na spotřebu energie, ekologii, ale i finanční stránku. Každý kilogram injektovaného uhlí snižuje spotřebu koksu přibližně o 0,85 až 0,95 kg.

Jak bylo zároveň předvedeno v podkapitole analytických metod, výroba koksu patří spolu s procesem válcování mezi největší konzumenty vody. Přidáváním drceného uhlí je tato voda ušetřena, a také je zvyšována produktivita pece, jelikož v ní koks vydrží delší dobu. Aplikace této metody obnáší výstavbu mlýnice a zásobníkových sil, které se podle velikosti vysoké pece liší. Tato výstavba je finančně značně náročná, ekonomická návratnost se nicméně pohybuje v řádu jednotek let.

Pro žádoucí efekt je nicméně nutné pečlivé vyvážení proudění plynu uvnitř pece. Pokud by byly dávky injektovaného uhlí příliš vysoké, vysoké pece by měly tendenci snižovat pracovní tempo. Tyto optimální dávky se liší termochemickými parametry konkrétních vysokých pecí, všeobecně však lze za efektivní množství označit hodnoty do 200 kg/t taveniny surového železa. Tento jev je předveden v tabulce 2. Jak tabulka 2 ukazuje, po překročení optimální dávky začíná efekt injektáže postupně upadat. Podíl koksu je nutné zvyšovat a tím opět narůstá spotřeba zdrojů. [22, 24].

Tabulka 2 Srovnání spotřeby zbytkového koksu a celkové spotřeby uhlí při různých úrovních přímého injektování drceného uhlí; přejato z [22]

	Míra injektování [kg/t TSŽ]	Míra zbytkového koksu [kg/t TSŽ]	Celková spotřeba uhlí [kg/t TSŽ]
Žádná	0	500	625
Optimální	150-180	310	538-568
Zvýšená	~ 240	270-300	577-615

TSŽ – tavenina surového železa

je předpokládáno, že na jeden kilogram koksu je spotřebováno 1,25 kilogramů uhlí

## 2.2.5 Zpětné získávání tepla při koksování

Při aplikaci technologie tzv. heat recovery je na konci procesu produktem pouze koks a odpadní teplo. Nevzniká žádný koksárenský plyn, což je směs plynů vznikající při koksování. Kromě velkého množství stopových sloučenin obsahuje hlavně vodík, dále metan a oxid uhelnatý – vzhledem k jeho vysoké koncentraci je jedovatý [25]. Vznikají pouze spaliny o vysoké teplotě, a to až 1250 °C. Toto teplo je následně zpětně využito opět v procesu koksování, popř. k výrobě páry nebo elektrické energie.

Alternativa k této metodě (non recovery) se liší pouze nevyužitím odpadního tepla. Spaliny jsou pročištěny a spolu s teplem vypuštěny do ovzduší.

Výhodou je rozpad emisí uhlovodíků na základní spalitelné sloučeniny díky vysokým teplotám [26]. U konvenčních metod koksování je nutné vzniklý koksárenský plyn před dalším zpracováním chladit, a to z teploty okolo 1000 °C na teplotu asi 80 °C. Potřebné množství vody k tomuto procesu se pohybuje mezi 2-4 m<sup>3</sup>/t karbonizovaného

uhlí. V případě využití odpadního tepla tak lze tuto vodu ušetřit a využít v některém z dalších výrobních procesů [22].

## 2.2.6 Turbínová jednotka pro obnovu tlaku<sup>6</sup>

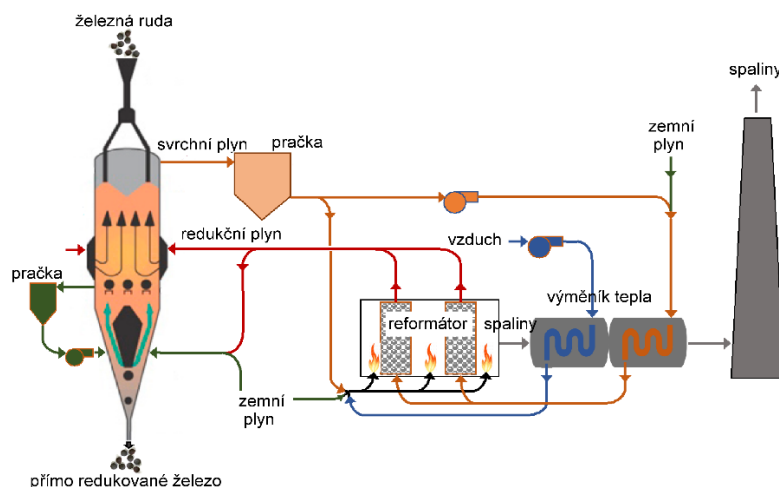
Turbínová jednotka je zařízení pro úsporu energie používané v kombinaci s vysokou pecí v ocelárnách. Má dva účely, a to regulaci tlaku pece a generaci elektrické energie. Plyn, který je ve vysoké peci ohříván, vstupuje do turbíny, a tím ji roztáčí. Pro její pohon tím pádem není potřeba žádné palivo, zároveň negeneruje oxid uhličitý ani jiný skleníkový plyn. Vyznačuje se vysokou provozní spolehlivostí a minimálními požadavky na údržbu. Jelikož musí být její konstrukce schopná odolat prachu a nečistotám, které do ní z pece vstupují, jsou na celý její výrobní proces kladeny vysoké požadavky.

Jednotka obsahuje také zařízení pro odběr prachu a dělí se na dva typy: mokrá nebo suchá podle toho, jestli k tomuto procesu využívá vodu. Suchý typ tuto vodu šetří a jelikož při odběru nedochází k poklesu teploty, generace elektrické energie probíhá s vyšší účinností [27, 28].

## 2.3 Alternativní metody – přímá redukce

Přímá redukce je jednou z popsaných alternativních metod pro výrobu železa a oceli. Principem alternativních metod je nahrazení koksu jiným redukčním činidlem. Výrobu oceli ve vysoké peci nicméně nebude nikdy možné provozovat zcela bez koksu. Jeho minimální dávka se pohybuje blízko hodnoty 260 kg/t taveniny. Pro alternativní metody je tudíž nutné zvolit odlišný přístup.

U metody přímé redukce je ke zpracování železných rud použit jako redukční činidlo například zemní plyn. Produkt má název přímo redukované železo (DRI) a používá se jako vstupní surovina do elektrických obloukových pecí (EAF). Schéma obvodu metody přímé redukce je předveden na obrázku 9. Při přímé redukci ale nedochází k odlučování železa od hlušiny, je proto nutné používat vysoce kvalitní rudy. Jelikož je ale po tomto proces nutná dostupná zásoba zemního plynu, nachází se tyto zařízení v rovníkových oblastech blízko zdrojů ropy a plynu.



Obr. 9 Schéma metody přímé redukce; přejato z [29] a upraveno

<sup>6</sup> Top Pressure Recovery Turbines (TRT)



Hlavní výhodou je využití uhlí nebo zemního plynu jako paliva. Proto již není nutné vyrábět koks, a to výrazně zlepšuje ekologický dopad. Emise uvolněného prachu jsou nízké a lze je snadno zachytit, stejně tak emise CO<sub>2</sub> jsou ve srovnání s konvenčními metodami dramaticky sníženy, a to až o 60 % [30]. Jelikož je ale z celého procesu odstraněn koks, je ušetřeno značné množství vody spotřebované během jeho výroby. Voda je po procesu koksování také výrazně znečištěna a její recyklace je značně omezena. Při metodě přímé redukce je tak možné použít vodu do velké míry recyklovat.

Zvýšený podíl hlušiny je nicméně důvodem pro zvýšenou spotřebu energie obloukové pece. Přímou redukovanou železo také představuje riziko požáru, proto je pro přepravu nebo skladování taveno do briket.

Přestože je metoda přímé redukce známá již řadu let, není její využívání příliš rozšířeno. V roce 2017 bylo množství oceli vyrobené tímto způsobem 86 Mt ve srovnání 1180 Mt u vysoké pece. [30] Stejně tak dodavatelů těchto systémů je jen velmi malé množství. S nejnovějšími poznatky a postupným přechodem na elektrické obloukové pece by ale mohl být přístup k této metodě pozměněn. Do té to práce je tudíž uvedena jako námět do budoucna, kterým je vhodné se dále zabývat. Dokazuje, že ve výrobě oceli je stále dostatek prostoru pro inovace a že i současné systémy jsou pouze jedním z dalších vývojových kroků výroby oceli, stejně jako bylo v minulosti spalování dřeva nebo dřevěného uhlí [22, 29, 30].

## 2.4 Zhodnocení výsledků

V tabulce 3 jsou zhodnoceny všechny z doposud představených úsporných metod. Metody jsou posuzovány z hlediska úspory vody, energie a uhlí, v potaz je vzat i finanční aspekt. Hodnoty úspory vody a energie jsou dále navíc zpracovány v grafu 3a) a 3b).

Technologie válcování za studena má možnost ušetřit 357,58 MJ/t, ale navyšuje spotřebu vody o 0,07 m<sup>3</sup>/t. Z hlediska spotřeby vody se tudíž nejvíce jeví jako vhodná. Oproti tomu technologie suchého hašení koksu, přidávání drceného uhlí a vakuového odplynění disponují značnou úsporou energie, a to více než 220 MJ/t. Zároveň všechny snižují spotřebu vody o více než 0,3 m<sup>3</sup>/t. Jsou to tudíž právě tyto technologie, kterým by ocelářský průmysl měl věnovat nejvíce pozornosti.

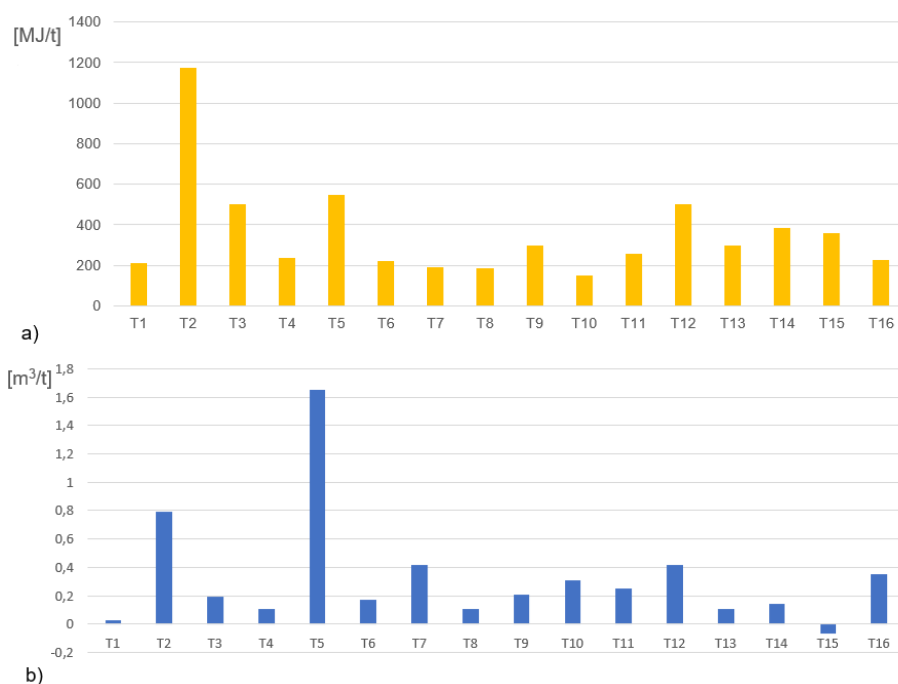
Zavedení turbínové jednotky pro obnovu tlaku, technologie chlazení pecí a technologie odprášení už nemá natolik slibné výsledky u úspory energie, jejich vliv na spotřebu vody je nicméně významný – 0,42 m<sup>3</sup>/t, 0,35 m<sup>3</sup>/t a 0,31 m<sup>3</sup>/t v tomto pořadí. Proto by při zavádění nových opatření měly být každopádně brány v potaz. Pokud budou tyto technologie posuzovány čistě z pohledu úspory vody, nejefektivnější je v sestupném pořadí technologie přidávání drceného uhlí, suché hašení koksu, odplynění vakuového čerpadla a turbínová jednotka pro obnovu tlaku. Jak ukazuje graf 3b, technologie přidávání drceného uhlí představuje suverénně nejvyšší úsporu. Následována je technologií suchého hašení koksu. Obě tyto technologie lze vyhodnotit jako ty nejvíce efektivní při snaze omezit spotřebu vody a energie [31].

V tabulce 3 jsou dva sloupce věnovány finanční stránce jednotlivých technologií. Každá ze zavedených metod s sebou obnáší dodatečné výdaje během svého provozu. Data ve sloupci s náklady obsahují právě tyto výdaje, nejsou v něm tudíž započítány náklady na pořízení dané technologie. Zpravidla jsou s nimi spojeny nemalé částky, ale úspory, které po dobu svého působení tyto inovace přinesou, tyto náklady dorov-

nají. Čím déle bude následně technologie v provozu, tím více budou náklady na pořízení zanedbatelné. Úspory během samotného provozu jsou zaznamenány v samostatném sloupci. Skutečná úspora je tudíž rovna rozdílu hodnot z těchto dvou sloupců. Nejedná se sice o nijak závratné částky, v měřítku celoroční produkce však představují úsporu v řádu milionů eur [31].

Nejdůležitějším poznatkem je ale skutečnost, že největší úspory vody je dosaženo analytickými metodami. Optimalizace produkce použitím analýzy toku materiálu přinesla v případové studii Gao a kol. [3] úsporu skoro 66 m<sup>3</sup> na výrobu jedné tuny oceli. Oproti tomu všechny technické metody dohromady – s výjimkou technologie válcování za studena, která žádnou vodu nešetří – přinesly úsporu 5,26 m<sup>3</sup>/t. Z celkového množství ušetřené vody je to asi jen 7,4 %.

Při využití výsledků z případové studie Gao a kol. [3], kde byla přímá spotřeba vody 194,82 m<sup>3</sup>/t oceli bez použití jakéhokoli úsporného opatření, a aplikace všech technologií, ke kterým jsou dostupné údaje, bude výsledná spotřeba vody 123,68 m<sup>3</sup>/t oceli. Jelikož je brána v úvahu pouze přímá spotřeba, není nutné uvažovat případné výsledky z metody posuzování životního cyklu. Nezanedbatelné výsledky by ale poskytly technologie nanokapalin přidaných do chladicí vody a optimalizace chladicí sekce. Obě tyto metody se týkají mimo jiné procesu válcování, a ten je z hlediska spotřeby i kvality vody jeden z nejnáročnějších. I jen mírný procentuální posun k vyšší efektivitě by tak znamenal další úsporu v rámci jednotek metrů krychlových [16, 18].



Graf 3 Hodnoty úspory a) energie a b) vody využitím příslušných technologií, přičemž T1 – kontrola vlhkosti uhlí, T2 – suché hašení koksu, T3 – zpětné získávání tepla při koksování, T4 – využití odpadního tepla při spékání, T5 – přidávání drceného uhlí, T6 – odvlhčení ve vysoké peci, T7 – turbínová jednotka pro obnovu tlaku, T8 – přímá výměna vody se struskou, T9 – technologie dvojitého předeřevu, T10 – technologie odprášení, T11 – efektivní využití spalin, T12 – technologie vakuového odplynění, T13 – technologie regeneračního spalování, T14 – podávání a nabíjení za tepla, T15 – válcování za studena, T16 – technologie chlazení pecí



### 3 Závěr

Cílem práce bylo shrnutí dosavadních znalostí a poznatků z oblasti spotřeby vody v ocelářském průmyslu a vytvoření aplikovatelného postupu pro její snižování spolu se sestavením a vyhodnocením tabulky jednotlivých metod pro úsporu vody.

Podklady pro tuto práci tvořily především vědecké články ze zahraničních zdrojů.

V úvodní kapitole je zhodnocen dosavadní vývoj ocelářského průmyslu spolu se současnou situací a zároveň je představena důležitost šetrného zacházení s vodními zdroji.

Následně je sestaven univerzální postup pro snižování vodní stopy spolu s případovými studiemi zpravidla z prostředí čínských závodů, jelikož právě Čína trhu s výrobou oceli dominuje. Tento postup vychází z modelace vodní sítě individuální ocelárny. Modelace představuje výchozí materiál pro další úsporné metody.

Dále je představena analýza toku materiálu, která umožňuje optimalizaci výrobního procesu tak, aby byla voda využívána s co největší efektivitou. Tato analýza vedla v případové studii ke snížení spotřeby vody o cca 35 %. Nepřímou spotřebou nejen vody se dále zabývá metoda posuzování životního cyklu.

V poslední řadě jsou blíže charakterizovány některé z konkrétních postupů pro úsporu vody. Tyto postupy a jejich vliv na výrobu oceli jsou zhodnoceny v tabulce, ze které je patrné, že jednotlivé metody by neměly být vnímány jen z jednoho úhlu pohledu. Místo toho je žádoucí nezapomínat na provázanost i s jinými faktory, které ovlivňují celkovou vytiženost zdrojů jako takových. Nejvýraznější provázanost je právě mezi spotřebou vody a spotřebou energie.

Přestože je problematika nadměrné spotřeby vody v průmyslu známá, není jí zatím poskytnuto adekvátní množství pozornosti. K dispozici již sice je řada kvalitních studií, další výzkum bude ale nanejvýš vhodný. Pro tato opatření je zároveň nejvyšší čas, nadměrné sucho postihuje už i Českou republiku. Server Seznam.cz zveřejnil v polovině dubna letošního roku reportáž [32], která o této problematice pojednávala. Sucho v letošním roce na našem území bude odpovídat tomu, které vědci předpovídali až pro rok 2050. Přestože již není možné vyhnout se adekvátním následkům pro tuto situaci, fatálním závěrům spojeným s nedostatkem vody má lidstvo stále možnost předejít.

## 4 Seznam použitých zdrojů

- [1] Industrial Water Usage – What Does It Take to Make These Items. *The 71 Percent* [online]. 2017 [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <https://www.the71percent.org/industrial-water-usage/>
- [2] HE, Kun a Li WANG. A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, č. 70, s. 1022-1039.
- [3] GAO, Cheng-kang, Mang-hui ZHANG, You-xuan WEI, Hong-ming NA a Ke-jing FANG. Construction and analysis of “water carrier” and “water value” in the iron and steel production. *Journal of Cleaner Productions*. 2016, č. 139, s. 540-547.
- [4] Odbor ekologie. Referenční dokumenty o nejlepších dostupných technikách (BREF). *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. 2013 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecisteni/referencni-dokumenty-bref/referencni-dokumenty-o-nejlepsich-dostupnych-technikach-bref--143226/>
- [5] Steel Industry Measures to Combat Global Warming. In: *The Japan Iron and Steel Federation* [online]. 2016 [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: <http://www.jisf.or.jp/en/activity/climate/documents/SteelIndustryMeasurestoCombatGlobalWarming-201601.pdf>
- [6] O'CONNOR, Nolan a Khanjan MEHTA. Modes of greenhouse water savings. *Procedia Engineering*. 2016, č. 159, s. 259-266.
- [7] LOMSADZE, Zurab, Ketevan MAKHARADZE, Marat TSITSKISHVILI a Rusudan PIRTSKHALAVA. Water resources of Kakheti and ecological problems. *Annals of Agrarian Science*. 2017, č. 15, s. 204-208.
- [8] LUTTER, Stephan, Christine POLZIN, Stephan GUILJUM, Tamás PÁLFY, Thomas PATZ, Monika DITTRICH, Lisa KERNEGGER a Ariadna RODRIGO. Jak plýtvání surovinami ohrožuje vodní zásoby Země. In: *Hnutí Duha* [online]. 2011 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: [https://hnutiduha.cz/sites/default/files/publikace/2012/09/vyuzivani\\_vody.pdf](https://hnutiduha.cz/sites/default/files/publikace/2012/09/vyuzivani_vody.pdf)
- [9] Hustota zalidnění. In: *Slide Player* [online]. [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/12171930/>
- [10] Water in the Productive Processes. In: *Unesco* [online]. [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: [http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Venice/pdf/special\\_events/bozza\\_scheda\\_DOW\\_9\\_1.2.pdf](http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Venice/pdf/special_events/bozza_scheda_DOW_9_1.2.pdf)

- [11] DWORAK, Tomas, Maria BERGLUND a Corneius LAASER. *EU Water saving potential (Part 1 – Report)* [online]. In: Berlin, 2007 [cit. 2019-04-27].
- [12] GAO, Chengkang, Dan WANG, Hui DONG, Jiuju CAI, Weiguang ZHU a Tao DU. Optimization and evaluation of steel industry's water-use system. *Journal of Cleaner Production*. 2011, č. 19, s. 64-69.
- [13] Životní cyklus. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2019 [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <http://firmy.mmspektrum.com/clanek/ekodesign-a-systematicke-rizeni-dopadu-na-zivotni-prostredi.html>
- [14] MA, Xiaotian, Liping YE, Congcong QI, Donglu YANG, Xiaoxu SHEN a Jinglan HONG. Life cycle assessment and water footprint evaluation of crude steel production: A case study in China. *Journal of Environmental Management*. 2018, č. 224, s. 10-18.
- [15] WANG, Can, Xinzhu ZHENG, Wenjia CAI, Xue GAO a Peter BERRILL. Unexpected water impacts of energy-saving measures in the iron and steel sector: Tradeoffs or synergies? *Applied Energy*. 2017, č. 205, s. 1119-1127.
- [16] NAYAK, Snatosh K. a Purna Ch. MISHRA. Enhancement of heat transfer by water–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and water–TiO<sub>2</sub> nanofluids jet impingement in cooling hot steel surface. *Journal of Experimental Nanoscience*. 2016, č. 11, s. 1253-1273.
- [17] RAVIKUMAR, Satya V., Krishnayan HALDAR, Jay M. JHA, Samarshi CHAKRABORTY, Ishita SARKAR, Surjya K. PAL a Sudipto CHAKRABORTY. Heat transfer enhancement using air-atomized spray cooling with water–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid. *International Journal of Thermal Sciences*. 2015, č. 96, s. 85-93.
- [18] WENDELSTORF, Jens, Karl-Heinz SPITZER a R. WENDELSTORF. Spray water cooling heat transfer at high temperatures and liquid mass fluxes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008, č. 51, s. 4902-4910.
- [19] KLIMEŠ, Lubomír, Pavel CHARVÁT, Tomáš BOHUNSKÝ, Jiří JAROMÍR KLEMEŠ a Josef ŠTĚTINA. Assessment of Possibilities for Reduction of Water Consumption in the Steel Industry. *Autoři, Název článku, Příspěvek na konferenci Conference on Process Integration for Energy Saving and Pollution Reduction – PRES'19, Kréta, 20.-23. 10. 2019*. [cit. 2019-05-15].
- [20] Coke Dry Quenching Schematic. In: *Industrial Efficiency Technology Database* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <http://ietd.iipnetwork.org/content/coke-dry-quenching>
- [21] Zelené certifikáty. *OEnergetice* [online]. 16. ledna 2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/komoditni-trhy/zelene-certifikaty/>

- [22] *Referenční dokument nejlepších dostupných technik (BAT) pro Výroba železa a oceli*. Evropská kancelář pro integrovanou prevenci a omezování znečištění, 2010. Dostupné také z: [https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecisteni/referencni-dokumenty-bref/2017/1/BREF\\_Zelezo\\_final\\_v2.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecisteni/referencni-dokumenty-bref/2017/1/BREF_Zelezo_final_v2.pdf)
- [23] ŽABENSKÝ, Lumír. *Čištění odpadních vod při výrobě koksu*. Ostrava, 2014. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava.
- [24] BYRTUS, Vojtěch. *Příprava prachového uhlí pro optimální průběh injektáže do vysoké pece*. Ostrava, 2016. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava.
- [25] HUDÁK, Igor. *Vliv inertních plynů na charakteristické parametry spalování*. Brno, 2017. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [26] DUBÍKOVÁ, Sandra. *Výroba koksu a jeho využití ve vybraném podniku*. Ostrava, 2010. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava.
- [27] Top-Pressure Recovery Turbine Plant (TRT). In: *JASE-W Japanese Smart Energy Products & Technologies* [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: [https://www.jase-w.eccj.or.jp/technologies/pdf/iron\\_steel/S-08.pdf](https://www.jase-w.eccj.or.jp/technologies/pdf/iron_steel/S-08.pdf)
- [28] Top Pressure Recovery Turbine (TRT) Generating System. In: *Mitsui E&S Group* [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://www.mes.co.jp/english/business/infra/industrial/detail804.html>
- [29] HAMADEH, Hamzeh, Olivier MIRGAUX a Fabrice PATISSON. Detailed Modeling of the Direct Reduction of Iron Ore in a Shaft Furnace. *Materials*. 2018, roč. 10, č. 11.
- [30] *World Steel in Figures 2018* [online]. 2018 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:f9359dff-9546-4d6b-bed0-996201185b12/World+Steel+in+Figures+2018.pdf>
- [31] GAO, Chengkang, Wen'gang GAO, Kaihui SONG, Hongming NA, Fan TIAN a Shuaibing ZHANG. Comprehensive evaluation on energy-water saving effects in iron and steel industry. *Science of the Total Environment*. 2019, č. 670, s. 346-360.
- [32] *Seznam Zprávy* [online]. 2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/katastrofa-s-niz-se-pocitalo-az-v-roce-2050-dorazila-driv-trpi-uz-polovina-ceska-70537?fbclid=IwAR18tIHp4o6IR7tJfGORVYINAx58dQfO9GFYgujvoD-vr7FUdNa2GqUNrA>